



Projet de détecteur de nouvelle génération pour la recherche de matière sombre non-baryonique : MACHe3, MAtrice à Cellules d'Helium 3 superfluide

Emmanuel Moulin

► To cite this version:

Emmanuel Moulin. Projet de détecteur de nouvelle génération pour la recherche de matière sombre non-baryonique : MACHe3, MAtrice à Cellules d'Helium 3 superfluide. Journées Jeunes Chercheurs, Nov 2003, La-Roche-en-Ardenne, France. pp.101-104. in2p3-00023795

HAL Id: in2p3-00023795

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00023795>

Submitted on 17 Feb 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Projet de détecteur de nouvelle génération
pour la recherche de matière sombre non-baryonique :
MACHe3,
MAtrice à Cellules d'Helium 3 superfluide**

Emmanuel MOULIN

*Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie,
Grenoble*



Résumé

MACHe3 (MAtrice à Cellules d'Helium 3 superfluide) est un projet de recherche de matière sombre non-baryonique utilisant l' ^3He superfluide comme milieu sensible. Les simulations réalisées sur un détecteur granulaire *i.e.* possédant un grand nombre de cellules, indiquent une très bonne réjection du bruit de fond. L'expérience sur une cellule prototype a mis en évidence la détection des neutrons ainsi que celle des muons cosmiques. Les premiers résultats sur le prototype multicellulaire ont permis de valider la détection d'électrons de conversion de basses énergies et confirment la possibilité de signer les événements en coïncidence entre les cellules. Une étude phénoménologique dans le cadre d'un modèle MSSM effectif a été réalisée pour tester la complémentarité de MACHe3 avec les détecteurs de matière sombre existants.

d' ^3He superfluide, permettrait d'atteindre un facteur de réjection important contre les événements constituant le bruit de fond, conduisant à un faible taux de faux événements "neutralino".

21.2 Le projet MACHe3

21.2.1 L'hélium 3 superfluide B : un milieu sensible privilégié

A ultra-basse température ($\simeq 100 \mu\text{K}$), l' ^3He est un milieu très intéressant car il constitue un bolomètre extrêmement sensible. En effet, autour de $100 \mu\text{K}$, l' ^3He est dans sa phase superfluide B dont le gap pour ses quasiparticules est extrêmement faible. L'utilisation de l' ^3He superfluide dans sa phase B est motivée par ses caractéristiques privilégiées par rapport aux autres matériaux :

- Etant donné que l' ^3He est un noyau de spin $1/2$, un détecteur à ^3He sera principalement sensible à l'interaction axiale, donc complémentaire aux détecteurs existants majoritairement sensibles à l'interaction scalaire. L'interaction axiale est largement dominante dans toute la région SUSY associée à une section efficace substantielle [8].
- Une très grande pureté due à sa phase superfluide. En effet, seul l' ^4He peut être dissout dans l' ^3He superfluide mais dans une concentration infiniment faible [6].
- Une section efficace de capture neutronique importante (~ 10 barns pour des neutrons de 10 keV), impliquant une signature univoque donc discriminante d'un signal WIMP.
- Une section efficace Compton faible : $\sim 9 \times 10^{-1}$ barns pour des rayons γ de 10 keV comparé à $\sim 2 \times 10^2$ barns pour le ^{74}Ge .
- Pas de rayons X intrinsèques.
- Un seuil de détection faible, inférieur à 1 keV.
- Un grand rapport signal sur bruit dû à la plage en énergie étroite attendue pour un signal WIMP. Celle-ci ne doit être étudiée qu'en dessous de 6 keV [7].
- Une sensibilité aux WIMPs de faibles masses ($2 < M_W < 200 \text{ GeV}$).

21.1 Introduction

L'estimation des paramètres cosmologiques a atteint un niveau de précision sans précédent avec les derniers résultats sur le fond diffus de rayonnement [1, 2] utilisés conjointement avec ceux des études sur les SNIa et les amas de galaxies. Les résultats récents indiquent que la contribution de la matière à la densité totale de l'Univers est principalement composée de matière sombre non-baryonique. Les théories supersymétriques prédisent que cette matière non encore observée et faiblement interagissante est composée de WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) dont le candidat le plus motivé est le neutralino [3].

De nombreuses collaborations ont développé des détecteurs pour chercher des candidats à la matière sombre non-baryonique. Ces détecteurs ont atteint une sensibilité suffisante pour commencer à tester des régions de l'espace des paramètres supersymétriques compatibles avec les contraintes cosmologiques et sur accélérateurs améliorant ainsi les limites supérieures d'exclusion d'interaction scalaire et axiale [4]. Ce type d'expériences directe présente des problématiques communes comme l'interaction des neutrons et la contamination radioactive du milieu sensible et des matériaux environnants.

Grâce à des travaux expérimentaux antérieurs [5, 6], un détecteur à ^3He superfluide pour la détection directe de matière sombre non-baryonique a été proposé [7]. Les simulations Monte Carlo ont montré qu'un détecteur à haute granularité, une matrice à cellules

21.2.2 La matrice granulaire

Le projet MACHe3 consiste en une matrice de 10 kg composée de 1000 cellules de 125 cm^3 remplies d' ^3He à

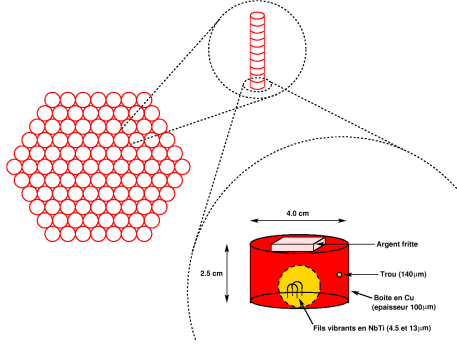


FIG. 21.1 – Vue de dessus de la matrice hexagonale. Chaque cylindre est divisé en 10 cellules d' ^3He bolométriques de type Lancaster. Chaque cellule consiste en un cylindre de cuivre rempli d' ^3He superfluide. Une pièce d'argent frittée nécessaire au refroidissement, est placée sur le dessus. Deux fils vibrants résonants en NbTi (VWR) de diamètre 4,5 et 13 μm respectivement, formant une demi-boucle, sont placés à l'intérieur.

100 μK . Il s'agit d'une matrice hexagonale présentée sur la figure 21.1, dont une configuration privilégiée est proche de celle en nid d'abeille. Chaque cylindre est divisé en 10 cellules bolométriques cylindriques de type Lancaster [5]. Le principe de réjection est basé sur la mesure du dépôt d'énergie et la corrélation entre les cellules pour discriminer les événements du bruit de fond (neutrons, rayons γ et muons) du signal WIMP. Cela permet de les rejeter efficacement étant donné qu'un WIMP n'interagirait que dans une seule cellule caractérisée par un dépôt d'énergie inférieur à 6 keV. La grande granularité combinée au dépôt d'énergie permet d'obtenir une très bonne réjection comme illustré sur la figure 21.2. Pour des rayons γ de 2,6 MeV, seulement un sur 5000 simule un événement WIMP, c'est-à-dire que 99,98% sont rejetés. Concernant les neutrons, on bénéficie d'une importante section efficace de capture. En effet, le processus de capture neutronique, $n + ^3\text{He} \rightarrow p + ^3\text{H} + 764 \text{ keV}$, libère 764 keV dans une seule cellule. Il permet d'atteindre une très bonne réjection, 99,90% des neutrons de 1 MeV sont rejetés [9]. Dans un environnement souterrain, le taux de faux événement estimé est inférieur à $\sim 10^{-1} \text{ jour}^{-1}$ pour les neutrons et $\sim 10^{-2} \text{ jour}^{-1}$ pour les muons [7].

21.3 Résultats expérimentaux

La composante élémentaire de MACHe3 est une cellule d' ^3He superfluide. Des tests expérimentaux ont été réalisés sur une cellule prototype avec un blindage de plomb entourant le cryostat pour estimer la contribution de la radioactivité naturelle [10]. Le principe de détection est basé sur l'amortissement de la résonance du fil vibrant. Plus précisément, l'amplitude de la vibration diminue lorsqu'une particule interagit à l'intérieur de la cellule. L'évacuation des excitations est réalisée par l'intermédiaire du trou. Voir [6] pour d'avantage de détails. Une stabilité en température d'une semaine par

cycle à $\sim 100 \mu\text{K}$ a été atteinte ainsi qu'un seuil de détection de l'ordre de 1 keV.

21.3.1 Détection des neutrons et des muons cosmiques

Une expérience avec une source de Am-Be a été mise en œuvre pour valider la réponse de la cellule à l'irradiation de neutrons. La cellule utilisée a consisté en un cylindre de cuivre de $\sim 75 \text{ mm}^3$ de volume. Le pic de capture neutronique a été observé [10]. 14% de l'énergie totale déposée par la capture est perdue en scintillation et en production de vortex. Pour séparer ces deux phénomènes, des études sur un nouveau prototype cellulaire avec un signal supplémentaire provenant du changement de température des parois de la cellule sont en cours de développement. La détection des muons pendant 12 heures a été mise en évidence comme présentée sur la figure 21.3. Les données expérimentales montrent un pic à 52 keV. Une simulation réalisée avec Geant4 [11] reproduisant le dispositif expérimental a été développée pour estimer l'énergie déposée par des muons de 2 GeV traversant la cellule. La simulation présente un pic à 67 keV. Un décalage (22%) par rapport à la valeur attendue est observé. La perte d'énergie pourrait être reliée à l'émission de photons UV et à la formation de vortex [12].

21.3.2 Expérience sur le prototype multicellulaire

Une expérience sur un prototype multicellulaire contenant une source d'électrons de conversion de ^{57}Co de basse activité ($\sim 0,1 \text{ Bq}$) a débuté au CRTBT en Septembre 2003 pour mettre en évidence la détection d'électrons de basses énergies et tester la corrélation entre les cellules. Le prototype dont une photo est présentée sur la figure 21.4, est composé de trois cellules identiques de volume $\sim 0,1 \text{ cm}^3$ remplies d' ^3He superfluide à 100 μK . Des événements à basse énergie ($\sim 6 \text{ keV}$) ont été détectés (figure 21.5). L'analyse de l'expérience et une simulation de la désexcitation de la source nous permettront de confirmer le spectre d'électrons de conversion interne. La figure 21.6 présente les spectres d'acquisition des cellules A et B après alignement temporel. Elle confirme l'existence d'événements en coïncidence. L'utilisation de la coïncidence entre les cellules est validée en tant que critère discriminant pour les événements du bruit de fond. Les taux de coïncidence entre deux et trois cellules ainsi que le spectre des électrons de basses énergies sont en cours d'étude [12].

21.4 Etude phénoménologique

Une étude phénoménologique dans le cadre d'un modèle supersymétrique phénoménologique effectif a été réalisée avec le code DarkSUSY [13] pour évaluer les performances de MACHe3 et sa complémentarité avec les détecteurs existants. Un large balayage de l'espace

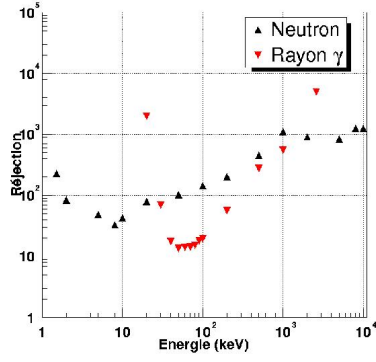


FIG. 21.2 – Réjection en fonction de l'énergie de la particule incidente, pour des rayons γ et des neutrons respectivement. La réjection totale est définie comme le nombre de particules incidentes sur le nombre de faux événement $\tilde{\chi}$. 99,98% des rayons γ de 2,6 MeV sont rejetés. Pour des neutrons de 1 MeV, la réjection est de 99,90%.

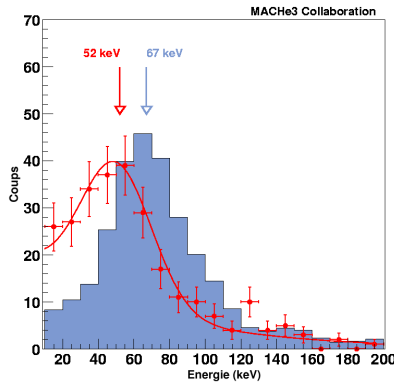


FIG. 21.3 – Détection des muons dans une cellule. Les données expérimentales (points) indiquent un pic à 52 keV. Le résultat de la simulation Geant4 (histogramme) décrivant les principales caractéristiques du dispositif expérimental, fournit un pic à 67 keV.

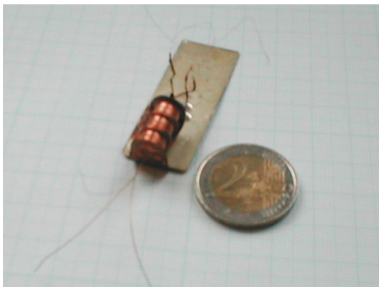


FIG. 21.4 – Photo du prototype multicellulaire composé de trois cellules. Les fils vibrants de $4,5 \mu\text{m}$ de diamètre sont visibles. La cellule centrale dont les parois sont communes avec les cellules voisines contient la source d'électrons de conversion de ^{57}Co .

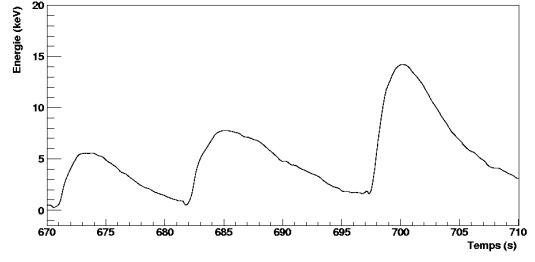


FIG. 21.5 – Spectre d'acquisition. Détection d'événements de basse énergie.

des paramètres supersymétriques a été effectué aboutissant à un nombre total de modèles de $\sim 2 \times 10^6$ [8]. Les contraintes cosmologiques et sur accélérateurs ont été considérées. La section efficace $\tilde{\chi} - ^3\text{He}$ a été évalué à l'aide du code DarkSUSY pour obtenir le taux d'événement $\tilde{\chi}$ pour une matrice de 10 kg et le comparer avec celui du bruit de fond [7]. Un grand nombre de modèles donne un taux supérieur à celui estimé de faux événement induit par les neutrons ($\sim 10^{-1} \text{ jour}^{-1}$) ou à celui estimé pour les muons ($\sim 10^{-2} \text{ jour}^{-1}$). Ce dernier ($10^{-2} \text{ jour}^{-1}$) est choisi comme la limite inférieure pour MACHe3. Les modèles donnant un taux supérieur à celui du bruit de fond muon sont sélectionnés. La figure 21.7 montre comment ils sont distribués dans le plan section efficace scalaire sur proton vs masse du neutralino. La région DAMA est représentée ainsi que les courbes d'exclusion d'Edelweiss et de CDMS et leurs projections. Il est intéressant de remarquer que des modèles se situent en dessous des limites projetées par les détecteurs scalaires (Edelweiss [4], CDMS [14]), alors qu'ils donnent un taux d'événement supérieur à la limite utilisée pour MACHe3.

21.5 Conclusion

Il a été montré que le détecteur MACHe3 permet une très bonne réjection du bruit de fond. Le principe de détection ainsi que la détection des muons cosmiques dans la composante élémentaire de MACHe3 a été présentée.

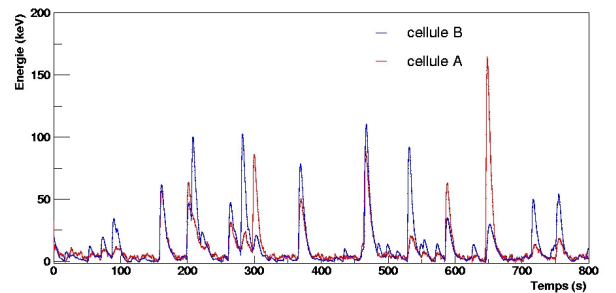


FIG. 21.6 – Événements de coïncidence. L'alignement temporel des spectres d'acquisition des cellules A et B montrent la présence d'événements en coïncidence entre les deux cellules.

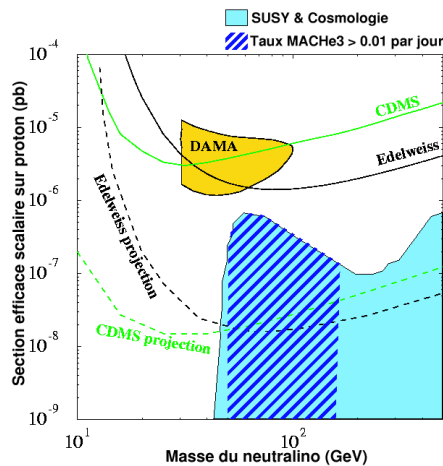


FIG. 21.7 – Section efficace scalaire sur proton en fonction de la masse du neutralino $\tilde{\chi}$. Les limites d'exclusion des expériences Edelweiss [4] et CDMS [14] sont présentées ainsi que la région DAMA à 3σ [15]. Les lignes en pointillés indiquent les projections limites pour Edelweiss et CDMS. Les points en bleu clair sont les modèles satisfaisant aux contraintes sur accélérateurs et cosmologiques. La région bleue hachurée correspond aux modèles donnant un taux d'événement neutralino dans MACHe3 supérieur au bruit de fond estimé à 10^{-2} jour $^{-1}$.

Les premiers résultats sur le prototype multicellulaire sont très encourageants. Ils permettent de mettre en évidence la détection d'électrons de basses énergies et de valider l'utilisation de la corrélation entre les cellules pour les discriminer les événements constituant le bruit de fond. Il a été calculé qu'un détecteur (MACHe3) de 10 kg permettrait d'obtenir dans de nombreux modèles SUSY un taux d'événement $\tilde{\chi}$ supérieur au bruit de fond estimé. MACHe3 permettrait donc potentiellement d'atteindre une large partie de la région SUSY non exclue par les limites actuelles sur collisionneurs et les projections limites des détecteurs actuels.

Remerciements

Je voudrais remercier la coordinatrice de ma session ainsi que les organisateurs des JJC 2003.

Références

- [1] D. Spergel *et al.*, *Astrophys. J. Sup.* **148** (2003) 175
- [2] A. Benoit *et al.*, *A&A* **Vol.399, No.3** (2003) p.L25
- [3] G. Jungman *et al.*, *Phys. Rept.* **267** (1996) 195
- [4] A. Benoit *et al.*, *Phys. Lett.* **B545** (2002) 43
- [5] G. Pickett, *Czech. Jour. of Phys.* **46** (1996) Sup. S6
- [6] C. Bäuerle *et al.*, *Nature* (1995) **332**,
C. Bäuerle *et al.*, *Phys. Rev.* **B57** (1998) 22
- [7] F. Mayet *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.* **A455** (2000) 554

- [8] F. Mayet *et al.*, *Phys. Lett.* **B538** (2002) 257
- [9] E. Moulin *et al.*, à paraître dans *Proc. of the 4th International Conference on Where Cosmology and Fundamental Physics Meet*, Marseille, June 2003, astro-ph/0309325
- [10] D. Santos, E. Moulin *et al.*, *en préparation*
- [11] S. Agostinelli *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.* **A506** (2003) 250
- [12] E. Moulin, D. Santos *et al.*, *en préparation*
- [13] P. Gondolo, astro-ph/0211238
- [14] D. Abrams *et al.*, *Phys. Rev.* **D66** (2002) 122003
- [15] R. Bernabei *et al.*, *Phys. Lett.* **B480** (2000) 23